

7. CHARGE COUPLED DEVICES

Principi di funzionamento e principali parametri

Introduzione

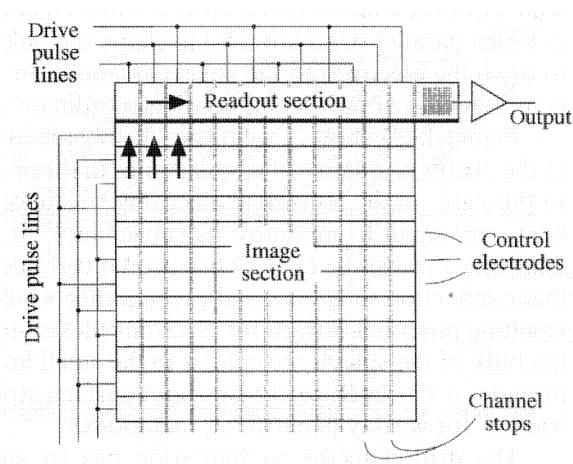
I CCD (Charge Coupled Devices) furono realizzati per la prima volta nel 1969 presso i Laboratori della Bell (Bell Labs) – da Willard S. Boyle e George E. Smith, premi Nobel per la Fisica nel 2009 - con lo scopo di costruire memorie elettroniche analoghe alle memorie magnetiche. Rapidamente i CCD sono diventati uno strumento molto diffuso in campo ottico, come dispositivi in grado di registrare immagini: un equivalente elettronico della pellicola. I CCD sono attualmente molto utilizzati nella vita di tutti i giorni (videocamere e telecamere digitali) e nella ricerca (con grande diffusione in campo astronomico). Il loro campo di applicazioni si è esteso anche in intervalli spettrali diversi dal visibile, come i raggi X.

Il CCD è un dispositivo a stato solido costituito da una matrice bidimensionale di sensori (elementi sensibili alla radiazione). Ogni sensore o *pixel* (*picture element*) ha in genere forma quadrata (ma può essere anche rettangolare), con dimensioni che vanno, orientativamente, da 30 mm fino a 5 mm di lato. Una dimensione tipica è 10 mm.

I pixel sono disposti in matrici, in genere quadrate (o rettangolari). Dimensioni tipiche in pixel della matrice sono 512x512, 1024x1024, ma si arriva oggi (2006) fino a 8192x8192 pixel sul singolo chip.

Ogni pixel “ospita”, come vedremo, una buca di potenziale, in cui può essere raccolta una carica elettrica (elettroni) prodotta dalla luce o da altro tipo di radiazioni che giungono in quel pixel.

La struttura di un CCD è di fatto un insieme di colonne (o di righe) di pixel adiacenti, opportunamente isolate elettricamente l’una dall’altra tramite *channel stops*. Su di un bordo della matrice, ortogonalmente alle colonne, è collocata una riga di pixel adibita esclusivamente alla lettura (*readout section*).



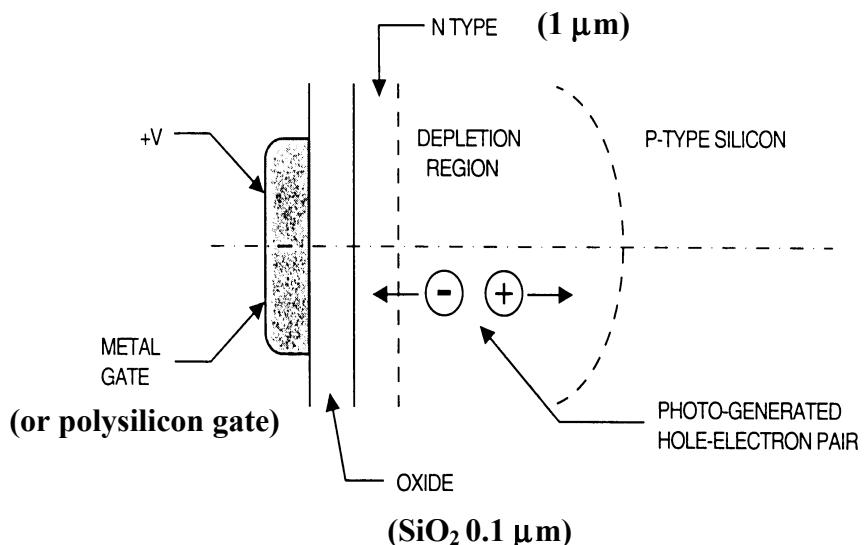
L’informazione (carica elettrica) che è stata raccolta dai pixel di una colonna durante l’esposizione, viene letta facendola scorrere lungo quella colonna, trasferendola da un pixel all’altro. La carica proveniente dalle diverse colonne viene raccolta in parallelo dalla riga di *readout* posta all’estremità della matrice e da questa trasferita, un pixel alla volta, all’amplificatore di carica, convertita in tensione, trasformata in un segnale digitale tramite un ADC e quindi registrata in memoria. Alla

fine di questo processo a ogni pixel risulta associato univocamente un numero, che costituisce l'immagine digitale.

Esistono, come vedremo, anche altre modalità di lettura del CCD, tuttavia la struttura di un CCD è sempre “per colonne” (o per righe).

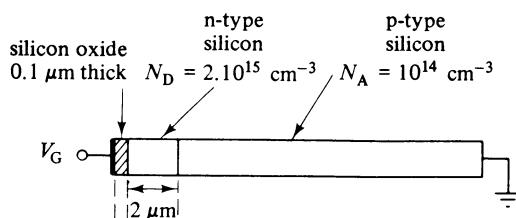
7.1 Struttura fisica del singolo pixel e meccanismo d'immagazzinamento della carica.

La struttura del singolo pixel di un CCD è rappresentata in figura ed è la stessa di un condensatore MOS (metal-oxide-semiconductor):



Un tipico dispositivo è realizzato a partire da un substrato di Si di tipo p (ma si può partire anche da un wafer di tipo n). Su questo substrato si deposita un layer (di spessore dell'ordine del mm) di Si di tipo n. Su questo layer si realizza uno strato isolante di biossido di Si (SiO₂) di circa 0.1 mm di spessore (*Oxide*). Infine un ultimo strato di metallo o di Silicio policristallino ad alto drogaggio costituisce il *gate* conduttore.

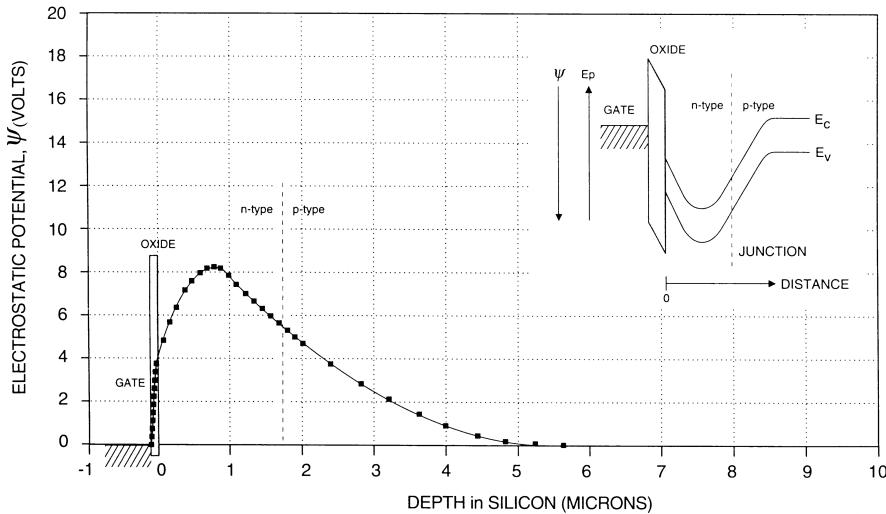
Nella figura che segue è mostrata la struttura schematica dei vari layers in una situazione realistica di spessori e drogaggi.



Per le note proprietà delle giunzioni semiconduttrici, tra la zona n e la zona p si forma una regione d'impoverimento (depletion layer) che viene poi polarizzata inversamente fino a impoverire completamente la zona n. (E' sufficiente una piccola tensione a causa del piccolo spessore della

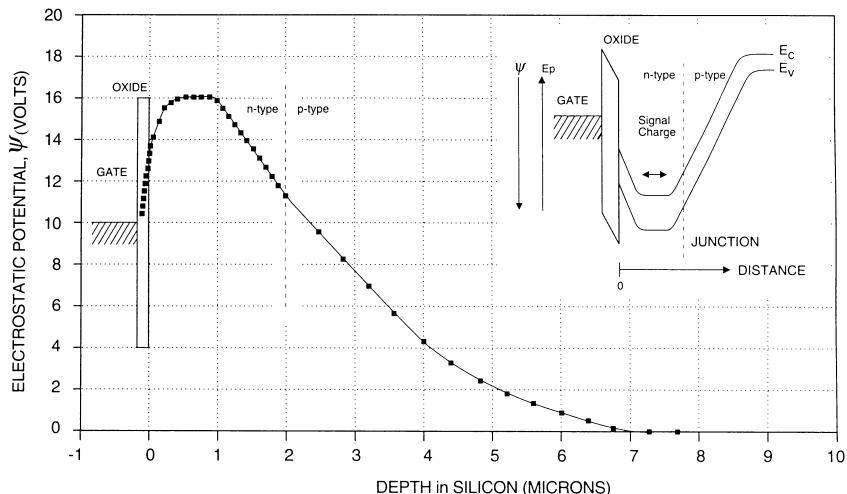
zona n). La zona p risulta in genere impoverita solo parzialmente a causa del suo spessore molto maggiore (centinaia di micron).

In queste condizioni l'andamento del potenziale lungo la sezione del pixel è quello mostrato nella figura che segue.



Si ha un massimo del potenziale Y (e quindi un minimo dell'energia potenziale che è data, come noto, da $E_p = -qY$) localizzato nella regione n a una certa distanza dallo strato di ossido.

Se si applica al gate una tensione positiva (tipicamente 10 V), la polarizzazione inversa della giunzione viene aumentata e la buca di potenziale diventa più profonda (inoltre il depletion layer si estende maggiormente nella zona p, che è quella meno drogata). In questa buca di potenziale possono essere raccolti gli elettroni generati da un qualsiasi processo di produzione elettrone-buca (luce visibile o radiazioni di altro tipo). La figura che segue mostra questa buca di potenziale parzialmente riempita da un certo numero di elettroni.



Come si vede, la buca è localizzata a una certa distanza dall'ossido. Questa struttura del CCD si chiama a *canale sepolto* (*buried channel*) in quanto forma un “canale” di potenziale nel quale le cariche possono essere raccolte.

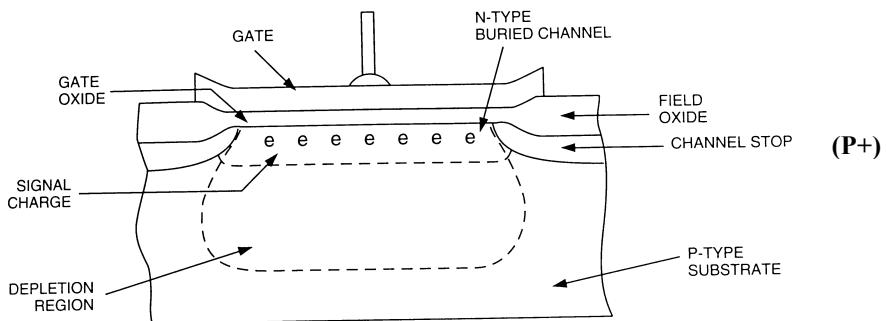
Quando un fotone visibile o un fotone di alta energia (raggio X o gamma) o una particella carica, interagiscono con la zona attiva (il depletion layer) di un pixel del CCD, producono una o più coppie elettrone-buca. Le buche sono asportate dal campo elettrico verso la zona p+ fuori dal canale, mentre gli elettroni sono raccolti nel canale, *nella buca di potenziale corrispondente al pixel in cui sono stati prodotti*.

Il layer isolante è essenziale in questo processo in quanto trasforma la struttura a diodo del singolo pixel (nel quale la carica prodotta dai fotoni fluirebbe all'esterno del circuito) in quella di un condensatore MOS (Metallo-Ossido-Semiconduttore) nel quale la carica rimane immagazzinata.

E' possibile realizzare CCD in maniera più semplice, senza la zona n. In tal caso il minimo del potenziale è localizzato a ridosso dell'ossido. Così erano costruiti i primi CCD. Questa configurazione pone però dei limiti all'efficienza del trasferimento della carica da un pixel all'altro durante la lettura e viene raramente utilizzata.

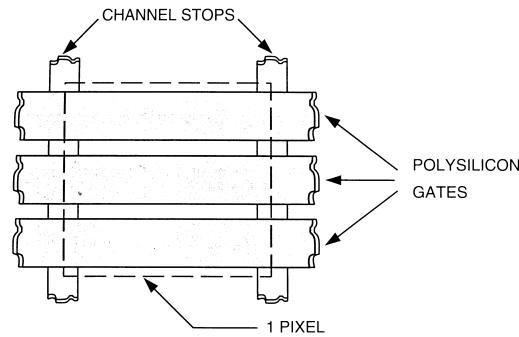
Come detto in precedenza i singoli pixel sono raggruppati in colonne separate elettricamente l'una dall'altra mediante *channel stops*. Questa separazione è necessaria per confinare gli elettroni sotto il gate e ridurre la probabilità che gli elettroni dei pixel di una colonna possano migrare nei pixel delle colonne adiacenti.

La figura che segue mostra la sezione di un pixel, in senso ortogonale alla colonna, con la struttura dei channel stops.



In questo caso i channel stops sono realizzati con una zona di maggiore spessore dell'ossido (0.5 – 1.5 mm) sotto la quale è diffusa una zona fortemente drogata di tipo p (p+). A causa del maggiore spessore dell'ossido sopra la zona p+ la tensione sopra questa zona è minore di quella presente sotto il gate, sopra la zona n. Si genera pertanto una polarizzazione inversa tra la buca di potenziale e il channel stop che impedisce la migrazione laterale delle cariche maggioritarie (elettroni) dalla zona n alla zona p+, realizzando di fatto un confinamento laterale.

Anche lungo la colonna è necessario attuare un confinamento per isolare i pixel l'uno dall'altro. Lungo la colonna si attua anche il trasferimento del segnale. Per comprendere come questo avvenga è necessario osservare la struttura superficiale di un singolo pixel:



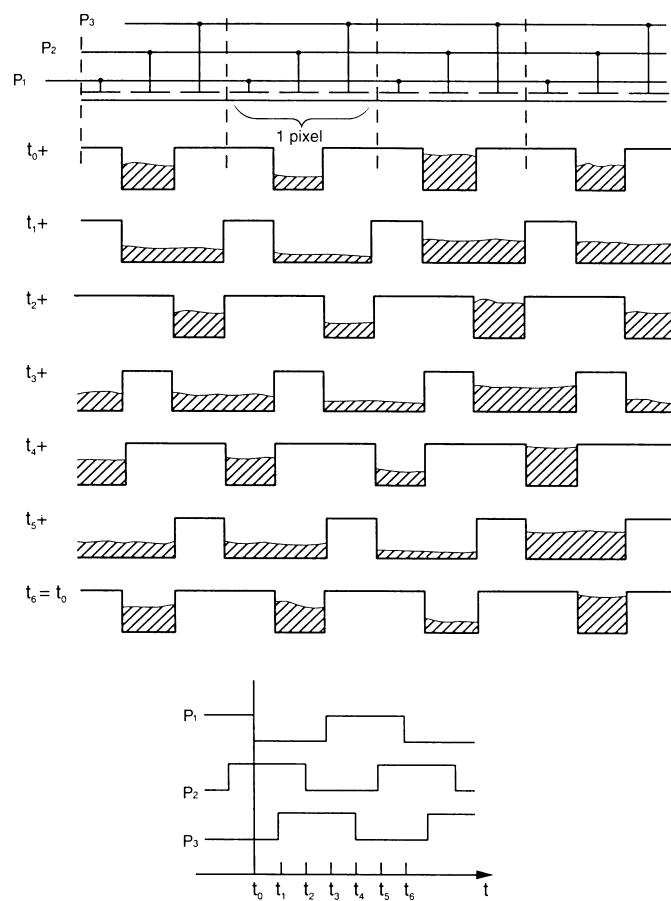
In questa configurazione il canale sepolto si trova tra i due channel stops e su ogni singolo pixel sono posti tre gates. Se il potenziale dell'elettrodo centrale è maggiore degli altri due, la buca di potenziale sarà localizzata solo in quella zona. Tutti gli elettroni creati nella zona confinata dai channel stops e dai due elettrodi a potenziale minore tenderanno a diffondere e a essere raccolti nella buca di potenziale centrale, mentre le buche diffondono fuori e vengono raccolte nella zona di tipo p posta più in profondità del canale sepolto.

Esistono anche altre strutture di pixel, che dipendono dal tipo di meccanismo di lettura.

7.2 Il trasferimento della carica durante la lettura

La peculiarità dei CCD sta proprio nella maniera in cui l'informazione viene trasferita da un pixel all'altro lungo una colonna. Attraverso un'opportuna variazione delle tensioni dei gates ogni pixel trasferisce il suo "pacchetto" di carica al pixel adiacente (*charge transfer process*).

Analizziamo questo meccanismo nel caso della struttura di pixel vista in precedenza.



Ciascuno dei tre gates che controllano i pixel è pilotato con una tensione a gradino (ON – OFF) con un’opportuna fase rispetto agli altri gates.

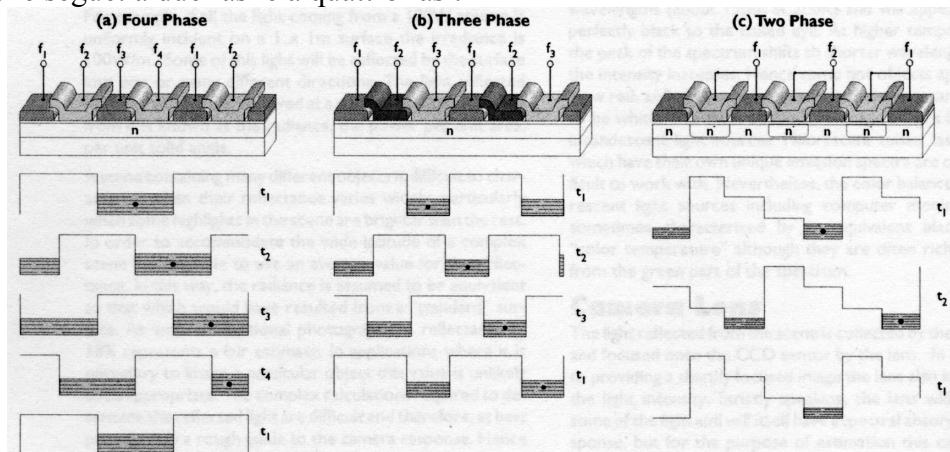
Tra il tempo t_0 e il tempo t_1 solo il gate centrale (P_2) è ON: la carica si accumula nella buca di potenziale centrale.

Tra il tempo t_1 e il tempo t_2 il potenziale dei gate P_1 e P_2 non cambia mentre quello del gate P_3 diventa ON: la buca di potenziale si allarga sotto i gates P_2 e P_3 e la carica si distribuisce nella buca allargata.

Tra il tempo t_2 e il tempo t_3 anche il potenziale P_2 diventa OFF: la buca si localizza solo sotto l’elettrodo P_3 .

Dopo una fase completa si vede facilmente che la carica inizialmente sotto il primo pixel si è trasferita sotto il secondo, quella sotto il secondo sotto il terzo e così via. Le buche di potenziale rimangono sempre separate e pertanto le informazioni dei singoli pixel non si “mischiano” tra loro.

Il sistema illustrato si chiama a tre fasi. Esistono anche altri due modi di trasferire la carica, mostrati nella figura che segue: a due fasi e a quattro fasi.

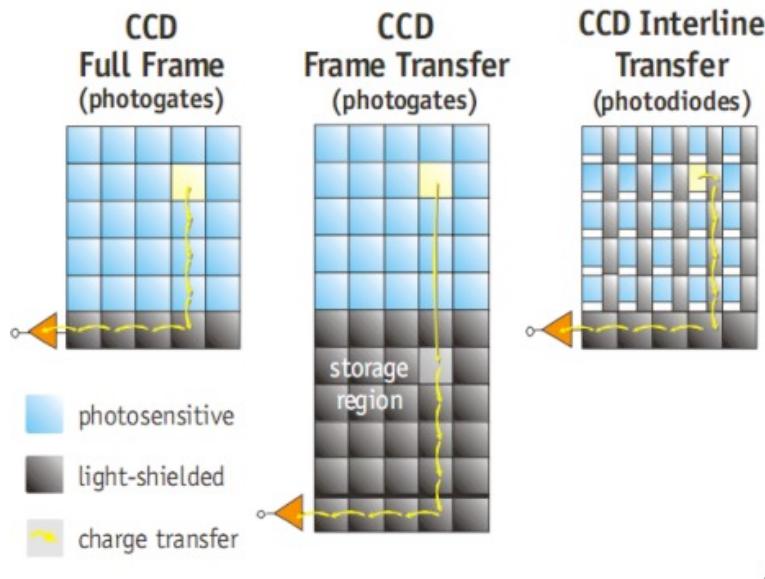


Per quanto il principio sia lo stesso, ogni modo richiede una diversa struttura del pixel e ha i suoi vantaggi e i suoi svantaggi. Per esempio il sistema a tre fasi ha una minore capacità di immagazzinamento della carica (FWC: Full Well Capacity) rispetto a quello a quattro fasi, ma una migliore risoluzione spaziale.

7.3 Modalità di lettura della matrice

Esistono tre modi di leggere la matrice di un CCD, che corrispondono a tre tipi diversi di chip:

1. scansione progressiva (progressive scan)
2. trasferimento di linea (interline transfer)
3. trasferimento di quadro (frame buffer transfer)



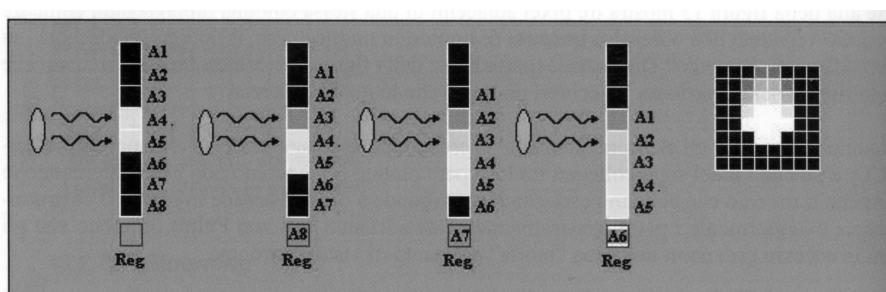
Nel trasferimento a scansione progressiva, che è quello più frequentemente utilizzato (tipico dei chip FULL FRAME) e che abbiamo illustrato all'inizio, non è possibile effettuare un'esposizione mentre si esegue la lettura (a meno che l'intensità non sia molto bassa e quindi i tempi d'integrazione lunghi rispetto alla velocità di lettura) per evitare l'effetto di **“smearing”** del segnale, di cui parleremo in seguito.

Nel trasferimento interlineae (tipico dei chip INTERLINEA) l'informazione viene trasferita molto rapidamente (circa 1 ms) a una colonna di pixel non esposti alla luce e quindi letta nel solito modo. Ciò ha il vantaggio di consentire una seconda esposizione in tempi molto rapidi, mentre avviene la lettura delle colonne di readout. A questa configurazione tuttavia corrisponde un minore rapporto tra l'area attiva e l'area complessiva del CCD (**fill factor**) e quindi, come vedremo, una minore efficienza quantica.

Nel trasferimento di quadro (chip FRAME TRANSFER) l'informazione è trasferita a una matrice non esposta alla luce della stessa dimensione dell'area attiva. Si ottiene una velocità di lettura “di compromesso” rispetto agli altri due sistemi (circa 1 ms) con il vantaggio di nessuna perdita in area attiva e lo svantaggio di un chip complessivamente di dimensioni doppie.

7.3.1 Smearing

Se durante il tempo di lettura del CCD questo è ancora esposto a un flusso abbastanza intenso da generare un segnale si ha il fenomeno dello **smearing** dell'immagine, illustrato nella figura:



In genere per evitare lo smearing, possibile soprattutto durante il trasferimento a scansione progressiva il quale può portare a tempi di lettura abbastanza lunghi (secondi), è necessario bloccare

l'esposizione con un otturatore meccanico, come avviene con la pellicola di una macchina fotografica tra un'esposizione e l'altra.

7.3.2 Binning

Quasi tutte le camere CCD consentono di effettuare il **Binning**, cioè la lettura di gruppi di pixel alla volta. A esempio 2x2 pixel o 3x3 pixel. Di fatto i gruppi di pixel vengono letti come se si trattasse di un pixel solo, aumentando di fatto la dimensione del pixel e diminuendo la risoluzione spaziale, ma aumentando la sensibilità (è come se si lavorasse con una pellicola a grana più grossa) e la velocità di lettura. Nei casi in cui velocità e sensibilità siano più importanti della risoluzione il Binning è una procedura conveniente e può consentire un opportuno *matching* tra la dimensione del pixel e la focale del telescopio.

7.4 Parametri che caratterizzano un CCD

Oltre alla dimensione, al numero dei pixel, alla modalità di lettura e al fill factor, numerosi sono i parametri che caratterizzano il CCD, sia dal punto di vista delle prestazioni che della qualità. Li riportiamo complessivamente nella tabella che segue:

Tabella I. Parametri di un CCD

- ▶ Numero di pixel
- ▶ Numero massimo di elettroni per pixel FWC (Full Well Capacity)
- ▶ Anti Blooming o Non Anti Blooming (ABG o NABG)
- ▶ Efficienza quantica QE (Quantum Efficiency)
- ▶ Rumore di Lettura (Readout Noise)
- ▶ Range Dinamico (Dynamic Range)
- ▶ Corrente Termica o “di buio” (Dark Current)
- ▶ Efficienza di trasferimento di carica CTE (Charge Transfer Efficiency)
- ▶ Velocità di lettura
- ▶ Qualità del chip (Classe)
- ▶ Dimensione del pixel

7.4.1 Numero di pixel

Da 192x164 (alcune vecchie camere CCD come la St-4 SBIG) pari a circa 31 Kp, a... 1400 Megapixel (1.4 Gp) nei grandi array di CCD (il primo CCD aveva 6 pixel!...)

Il numero di pixel, insieme alla dimensione del pixel e alla focale del telescopio determina il “campo” osservato (FOV Field of View) cioè quanti gradi (o primi o secondi) di cielo sono compresi nella nostra immagine (vedi in seguito a proposito della scala dell'immagine). Determina anche le dimensioni massime di stampa di una foto (tenendo conto della qualità). Ma influisce anche sui costi (a parità di qualità un chip più grande è più difficile da ottenere), sui tempi di download dell'immagine sul “peso” dei file, con conseguenti implicazioni in fase di elaborazione.

7.4.2 FWC (Full Well Capacity – Capacità di Carica), ABG e NABG

Ogni pixel può contenere una carica massima e quindi un numero massimo di elettroni. Questo numero, chiamato **Full Well Capacity**, è caratteristico di ogni CCD. La FWC dipende dalla capacità e dalla tensione applicata alla buca di potenziale ed è espressa in elettroni. Un ordine di grandezza tipico della FWC è 10^5 .

Sopra la FWC non possono più venire accumulati elettroni e il pixel è saturato (completamente “bianco”). In genere la FWC dipende principalmente dalla dimensione del pixel (che determina direttamente la capacità elettrica del CMOS). Pixel più piccoli hanno una FWC più piccola.

La FWC determina, insieme al rumore di lettura (Read Noise) il Range Dinamico (vedi in seguito) del CCD e in alcuni casi può essere un parametro importante da tenere in considerazione se si vuole ottenere un numero alto di “livelli” in uscita. Con una FWC relativamente piccola la dinamica è sicuramente più limitata che con una FWC grande e c’è più rischio di una rapida saturazione sugli oggetti più luminosi.

Se la FWC viene superata può verificarsi l’effetto del **Blooming**: parte della carica in eccesso nel pixel può “travasare” nei pixel adiacenti lungo la stessa colonna (tra le colonne il fenomeno è evitato dai channel stops).

Il Blooming può provocare una distorsione dell’immagine per sovraseraturazione come quella mostrata in figura.



Esistono vari accorgimenti per eliminare il Blooming, come quello di creare una maggiore distanza spaziale tra pixel adiacenti, in ogni caso viene diminuita l’area attiva complessiva superficiale (fill factor) del CCD a scapito dell’efficienza quantica.

Esistono CCD dotati di antiblooming (ABG), che possono essere utili in alcune applicazioni. Ma, in genere, i CCD usati in astronomia sono senza antiblooming (NABG) in quanto la loro efficienza quantica è maggiore.

7.4.3 Efficienza quantica QE (Quantum Efficiency)

L’efficienza quantica è uno dei parametri più importanti del CCD. È definita come:

$$QE = \frac{\text{Numero di elettroni prodotti}}{\text{Numero di fotoni incidenti}}$$

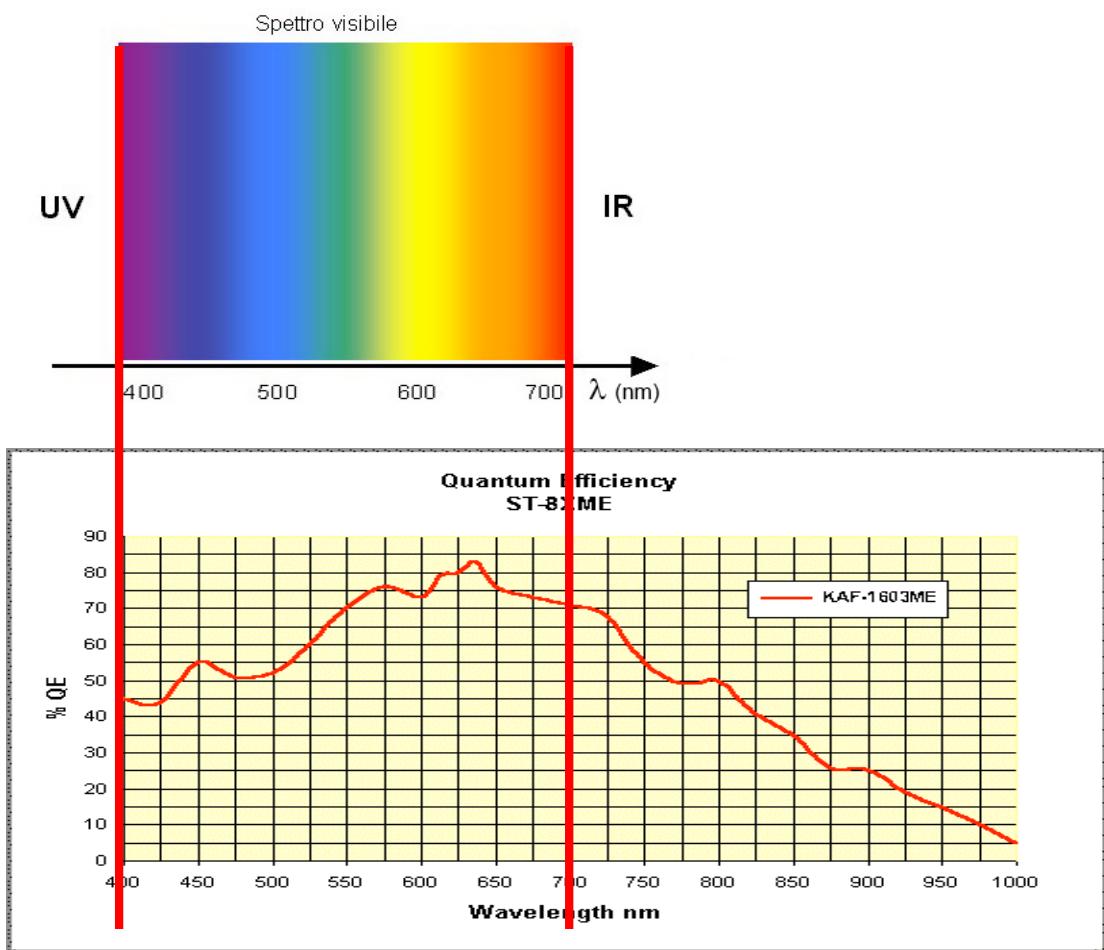
Se tutti i fotoni che colpiscono il CCD fossero “registrati” avremmo una QE del 100%. Ma questo non è mai vero, anche se in alcuni CCD e in un certo intervallo spettrale la QE supera il 90%. La QE dipende dalla lunghezza d’onda. La QE “integrale” (che è proprio l’integrale della QE su tutte

le lunghezze d'onda) ci dice che frazione di fotoni appartenenti a tutto lo spettro di sensibilità del CCD viene effettivamente rivelata.

In ogni caso i valori di QE dei CCD sono sempre molto più alti di quelli di una qualsiasi pellicola che in alcuni casi eccezionali e in un limitato intervallo spettrale (particolari emulsioni fotografiche) può arrivare massimo al 7% (ma tipicamente siamo al 1-2%). Inoltre i CCD non hanno il difetto di reciprocità delle pellicole: la loro sensibilità rimane inalterata nel tempo a prescindere dalla lunghezza del tempo di esposizione. La QE dei CCD è anche decisamente superiore a quella dei tubi fotomoltiplicatori.

La QE dipende dalle caratteristiche fisiche del Silicio, ma anche dall'architettura del chip e da quanta area sensibile è disponibile rispetto all'intera superficie del chip.

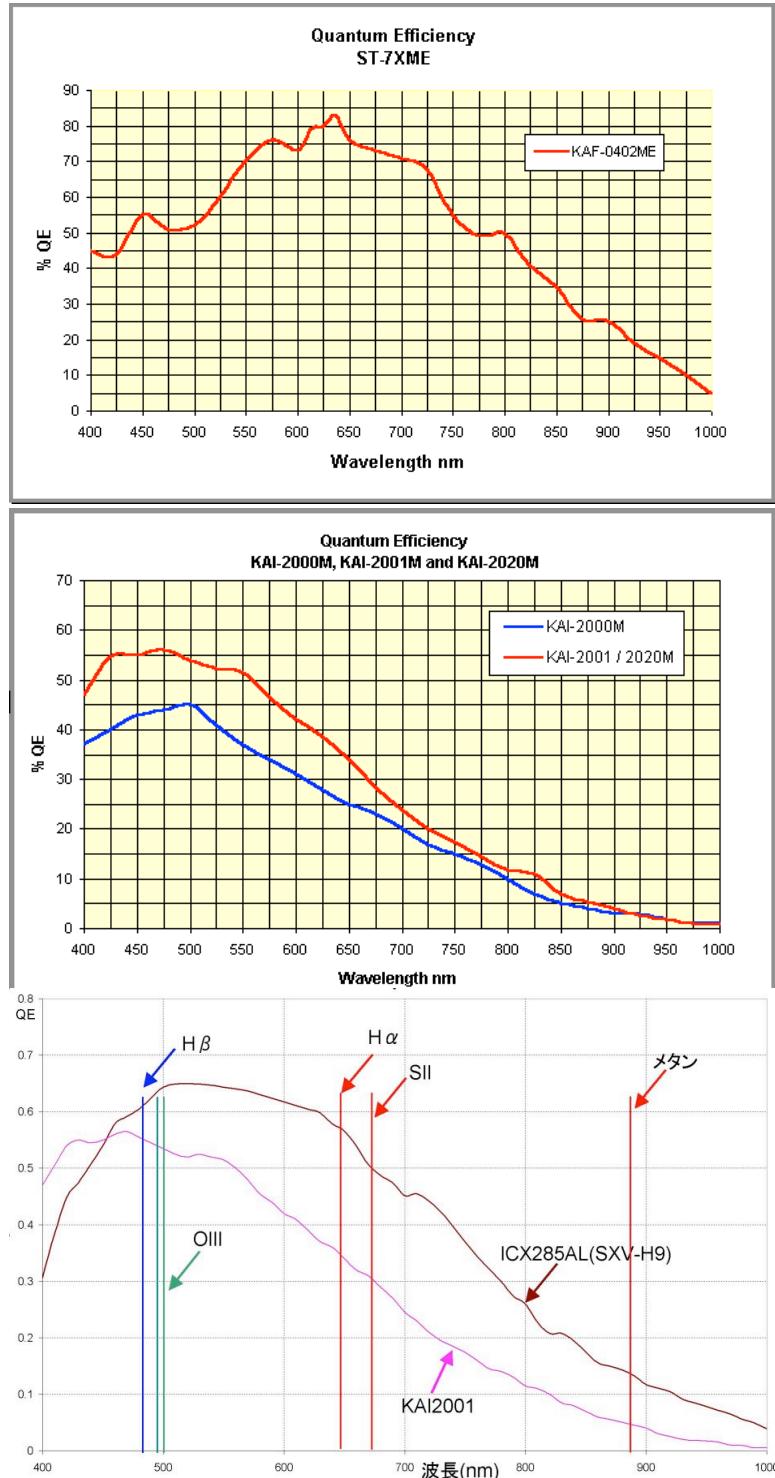
La QE di un CCD si estende notevolmente nell'infrarosso e va a zero a circa 1100 nm, corrispondente a un'energia dei fotoni di circa 1.1 eV che è *l'energy gap* del Silicio. Sotto questa energia il fotone non ha energia sufficiente per produrre una coppia elettrone-buca nel Silicio.



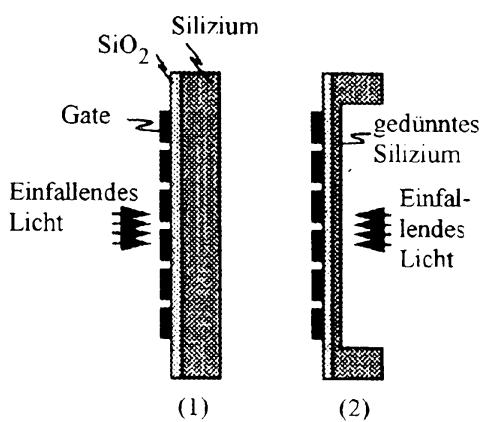
Nel grafico sopra è riportata una tipica efficienza quantica di un CCD in cui è evidenziato l'intervallo del visibile. Si vede come la QE va a zero verso i 1000 nm e come sia molto allargata verso l'infrarosso. Verso l'ultravioletto, sotto i 400-300 nm l'efficienza si abbassa drasticamente a causa del fatto che le strutture superficiali del CCD assorbono fortemente la radiazione, come mostrato nel grafico accanto. Un elemento rilevante è che la QE è in genere molto alta attorno alla lunghezza d'onda Ha dell'idrogeno (656.3 nm) che è una riga di emissione caratteristica di molti oggetti astronomici.

I CCD Frame Transfer e Full Frame sono quelli con QE più alta rispetto agli Interlinea. In alcuni CCD un sistema di microlenti permette di far convergere sui pixel anche quella frazione di fotoni che altrimenti colpirebbe una zona non sensibile del CCD, migliorando così la QE.

La QE dei CCD con antiblooming (ABG) è minore di quelli senza (NABG) in quanto negli ABG parte del chip viene usata per “drenare” il blooming e quindi i pixel occupano una superficie complessiva minore.



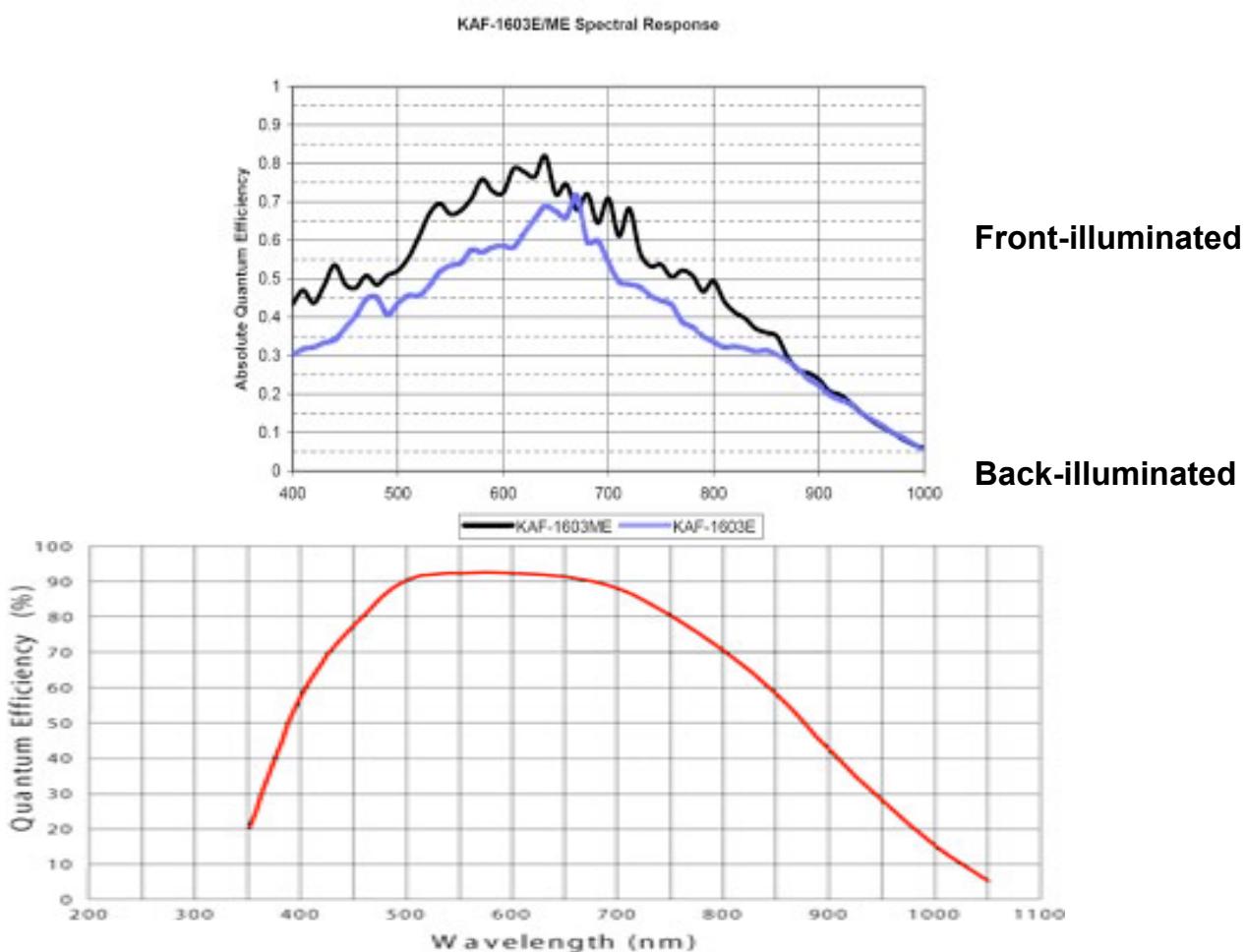
Confronto tra efficienze quantiche. Dall'alto in basso: Full Frame (KAF -0402ME), Interlinea (KAI) e AntiBlooming (Sony ICX295AL)



La QE maggiore è raggiunta dai CCD back-illuminated, illuminati “da dietro”, in quanto tutte le strutture microscopiche che servono al funzionamento del CCD (contatti di polarizzazione, etc.) e che impediscono a una frazione di luce di passare, sono posti solo nella parte superiore del chip. Nel caso dei CCD back-illuminated non solo la QE è maggiore (circa il 90%) ma è anche distribuita più uniformemente lungo tutto l’intervallo spettrale. Questo fa sì che la QE “integrale” nel visibile sia decisamente più alta (circa 90%) di quella degli altri CCD, che non supera tipicamente il 40% (vedi figura in basso).

Per essere illuminati da dietro i CCD devono essere assottigliati fino a spessori piccolissimi, dell’ordine di 15mm. Una lavorazione molto critica che rende questi dispositivi assai più costosi degli altri.

Confronto tra la QE di un dispositivo front-illuminated ed uno back-illuminated



7.4.4 Rumore di Lettura (Read Noise)

A causa del fatto che la capacità di uscita del CCD, che è quella del singolo pixel, è molto piccola (dell'ordine di 0.2 pF) il rumore elettronico dei CCD è straordinariamente piccolo. Questo soprattutto utilizzando uno shaping time (circa il reciproco della frequenza di lettura) abbastanza lungo e quindi un *readout rate* relativamente lento.

A causa di queste caratteristiche il CCD fornisce un rapporto Segnale/Rumore molto migliore rispetto a quello di tutti gli altri rivelatori.

Il RN si esprime in elettroni rms (root mean square) ed esprime, in elettroni, lo scarto quadratico medio della fluttuazione statistica del segnale in uscita, a segnale in ingresso costante.

Anche ammettendo di poter ridurre a zero tutte le altre cause di rumore (intrinseche al rivelatore, come il Dark Noise, o dovute alla natura statistica del segnale – Poisson o Shot Noise) il rumore di lettura resta il limite inferiore al rumore ottenibile in quanto dipende dalle caratteristiche elettriche del rivelatore dell'amplificatore in uscita. Più sofisticata è l'elettronica in uscita minore è il Read Noise.

Valori tipici del RN vanno da 17-13 e fino a 2-3 e.

Il Read Noise ovviamente è importante quando il livello del segnale è molto basso, ma in ogni caso il rumore di lettura gioca un ruolo non irrilevante nel limitare il numero di livelli del segnale in uscita, soprattutto nel caso di FWC piccole (vedi Range Dinamico)

7.4.5 Intervallo dinamico (Dynamic Range)

Il Range Dinamico (DR) di un CCD è il numero di livelli di intensità in uscita. Nel caso di un CCD monocromatico, il numero di sfumature disponibili tra il nero e il bianco.

Se potessimo misurare ogni singolo elettrone avremmo a disposizione come DR tutta la FWC del pixel. In pratica ogni lettura è affetta da una certa imprecisione dovuta al Readout Noise (RN).

Se in un pixel c'è un solo elettrone noi non leggiamo 1, ma $1 \pm \text{RN}$ (e quindi in questo caso, essendo RN di almeno alcuni elettroni, il segnale è "affogato" nel rumore) e se ci sono 100 elettroni leggiamo $100 \pm \text{RN}$, per cui, di fatto, il numero di livelli effettivamente disponibile è la FWC diviso il RN.

$$\text{Numero livelli} = \frac{\text{FWC}}{\text{RN}}$$

A esempio, nel caso del sensore Kodak KAF-3200ME, la FWC è circa 77.000 elettroni, il Read Noise circa 9 elettroni e quindi il numero di livelli è circa 8500.

Spesso il RD è misurato in decibel (dB) ed è dato da:

$$20 \log (\text{numero dei livelli})$$

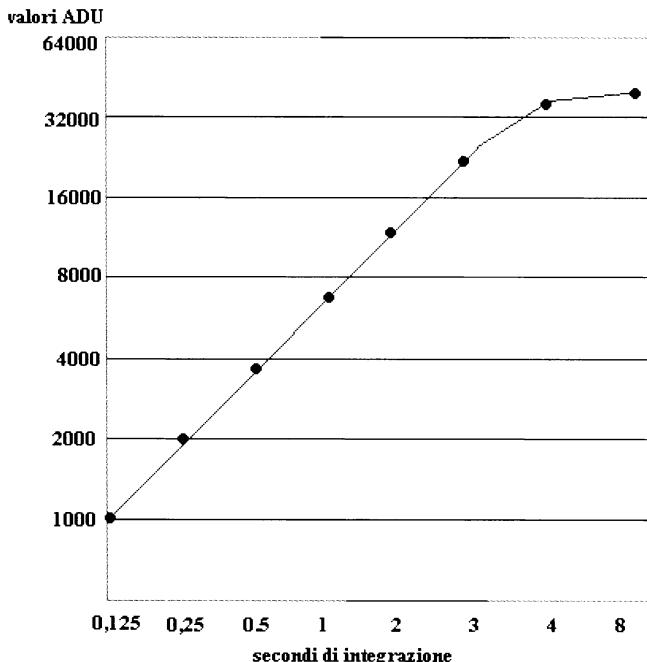
Nel caso precedente il range dinamico è circa 78 dB.

Bisogna considerare che il più delle volte, a causa del fondo dovuto al fondocielo e al rumore termico, solo il 10-20% dei livelli è utilizzabile per il segnale (gli altri si perdono sottraendo il fondo). Nel caso precedente possono essere utilizzabili magari solo un migliaio di livelli.

Bisogna quindi fare attenzione e dare un occhio alla "dinamica" disponibile quando si usano CCD con FWC non troppo grande. A esempio, nel caso di una FWC di 10.000 elettroni (tipica di sensori con pixel molto piccoli) e un rumore di lettura di circa 7 elettroni, abbiamo disponibili circa 1428 livelli. Nel caso peggiore che, a causa degli effetti di background (contributo termico e fondocielo) solo il 10% del segnale contenga informazioni sul soggetto che fotografiamo, abbiamo

effettivamente disponibili solo circa 140 livelli, cosa che può costituire un limite nella “profondità” di elaborazione e nella risoluzione fotometrica nella misura di differenze o variazioni di magnitudine.

Il segnale in uscita dal CCD, dopo essere stato convertito in tensione dall’amplificatore, viene convertito in un numero dal Convertitore Analogico Digitale (ADC Analog to Digital Converter) che è caratterizzato da un certo numero N di bit.



In genere ormai tutti i convertitori sono a 16 bit, pertanto ci sono $2^N = 65.536$ livelli (ADU, Analog to Digital Units) disponibili in uscita.

In numero di elettroni corrispondenti ad ogni ADU è fornito dal Guadagno (Gain) che deve essere opportunamente calibrato per fornire una adeguata rappresentazione di tutto il Dynamic Range.

Il Gain dipende dalla FWC e può andare da 1 elettrone a qualche elettrone per ADU.

La risposta in ADU di un CCD è lineare su un ampio intervallo, in funzione del numero di elettroni (o di fotoni).

Tuttavia, già prima di raggiungere la saturazione - il livello 65.535 - la risposta del nostro CCD comincia a diventare non lineare. L’inizio della non linearità varia da dispositivo a dispositivo e andrebbe misurata per il proprio CCD. Quando usciamo dalla linearità l’informazione fornita comincia a essere “deformata” e questo è importante soprattutto nelle applicazioni scientifiche, a esempio nella fotometria, in cui vogliamo conoscere con una certa precisione le intensità relative dei fotoni.

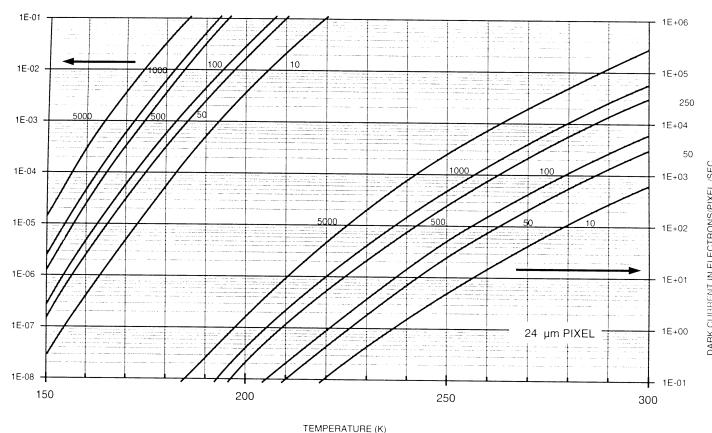
L’intervallo di valori del segnale in uscita in cui il dispositivo è lineare può essere misurato esponendo lo stesso soggetto (a esempio una stella) nelle stesse condizioni, per tempi via via più lunghi, a esempio 1 secondo, 2 secondi, 3 secondi, etc. e riportando su grafico (come quello sopra) i valori massimi dell’intensità misurata. Quando la retta comincia a curvare stiamo uscendo dalla linearità, ovvero dall’intervallo di funzionamento “corretto” del CCD. Questo in genere avviene ben prima del raggiungimento degli ultimi livelli e può manifestarsi già attorno al 50-60% del valore di saturazione.

7.4.6 Corrente Termica (Dark Current)

La **corrente termica**, data in elettroni/pixel/sec, è dovuta alla produzione termica di portatori di carica. In particolare da quelli generati nell’interfaccia Si-SiO₂, che a causa del gradiente di potenziale tendono a essere raccolti nelle buca di potenziale. Gli elettroni prodotti attraverso questo processo possono, in tempi sufficientemente lunghi, arrivare a riempirle, saturando il CCD. La corrente termica produce, in un certo tempo un pattern termico, caratteristico del CCD. Questo pattern termico è il **Dark Frame**, che viene sottratto dalle immagini CCD. La fluttuazione statistica

del Dark Frame costituisce il **Dark Noise** che è uno dei contributi al rumore che va considerato nel rapporto Segnale/Rumore nelle immagini CCD.

Poiché il rate di produzione delle cariche dipende dalla temperatura è possibile ridurre questo contributo lavorando a basse temperature. Tipicamente i CCD per applicazioni scientifiche, a causa dei tempi di acquisizione relativamente lunghi, lavorano raffreddati o con celle peltier, che abbassano la temperatura di 25 – 35 k rispetto all’ambiente, o con celle peltier a più stadi e particolari sistemi di ventilazione o con azoto liquido. A queste temperature valori tipici del Dark Noise vanno fino a frazioni di elettrone per pixel al secondo. Nel grafico che segue sono riportati i valori della dark current in funzione della temperatura per un CCD con pixel da 24 mm. Il parametro delle curve è il valore della corrente generata dal CCD per cm^2 in pA/cm^2 , che varia in funzione della qualità del dispositivo.



Il DN può essere ridotto di un ordine di grandezza o più usando i CCD a Multipinned-Phase (MPP). Si tratta di CCD in cui droganti impiantati sotto alcuni dei gates permettono di polarizzare questi gates direttamente, richiamando le buche nella zona d’interfaccia Si-SiO₂ e riducendo quindi drasticamente, per ricombinazione, gli elettroni prodotti e quindi la dark current proveniente dall’interfaccia.

L’uso di CCD MPP è in genere la norma con i CCD per uso astronomico i quali hanno in genere dark current particolarmente basse.

7.4.7 Efficienza di trasferimento della carica (CTE - Charge Transfer Efficiency)

Un parametro molto importante dei CCD è l’efficienza di trasferimento della carica, **CTE (Charge Transfer Efficiency)** che è una misura di quanti elettroni vengono persi in ogni passaggio da un pixel all’altro. La CTE è definita come:

$$\text{CTE} = 1 - \text{frazione di elettroni persi nel passaggio tra due pixel adiacenti}$$

Una CTE tipica dei moderni CCD è di 0.99999 (efficienza del 99.999 %) cioè un elettrone perso ogni 100,000.

Considerando che il numero di pixel che un pacchetto di cariche deve attraversare per arrivare all’amplificatore può arrivare ad alcune migliaia, si vede come sia essenziale un valore così piccolo della CTE. Con una CTE di 0.99999, dopo 1000 passaggi si perdono 1000 elettroni (di 100,000 elettroni ne arrivano 99,000) una frazione molto piccola della FWC.

I vecchi CCD che non lavoravano a canale sepolto avevano una CTE tipica dello 0.98000. Questo a causa degli stati energetici superficiali di trappola presenti nell’ossido (*fast surface states*). Si vede

bene che una CTE così cattiva limita drasticamente il numero dei pixel. Fa infatti perdere ben 2000 elettroni ogni 100.000 in ogni passaggio!

7.4.8 Velocità di lettura (Read-out rate)

La velocità di lettura del CCD, a causa della sua influenza sul readout noise in genere non è particolarmente elevata. In genere è compresa tra 50 kHz e 1 MHz. E' facile calcolare che alla velocità più elevata, nel sistema di lettura a scansione progressiva e con un tipico CCD da 1024 pixel di lato, il tempo di lettura è di circa 1 secondo.

Per migliorare il readout noise in applicazioni con scarso segnale si lavora con rate di lettura ancora più bassi (*slow scan*, attorno a 50 kHz) che corrispondono a tempi di lettura anche di alcune decine di secondi.

7.4.9 Classe del Chip (Qualità e difetti cosmetici)

Non tutti i chip sono uguali, oltre alla diversità di prestazioni (dark noise, readout noise, etc.) alcuni presentano difetti “cosmetici” più o meno importanti: uno o più pixel inattivi, colonne inattive o gruppi (cluster) di pixel inattivi. La qualità di un CCD viene misurata, in maniera solo orientativa e che può variare da un costruttore all’altro, con un grado. Un esempio è dato nella tabella nel seguente.

KAF 401E	Grado 0	Grado 1	Grado 2
Pixel difettosi	0	5	10
Cluster difettosi	0	0	4
Colonne difettose	0	0	2

Spesso le differenze di prestazione tra un CCD “cattivo” e uno “buono” sono molto piccole (e diventano importanti solo per applicazioni molto spinte in cui non si può fare a meno di avere il “meglio”), mentre le differenze di prezzo possono essere molto grandi. Un CCD “normale” per applicazioni scientifiche può costare qualche migliaio di Euro. Un CCD molto buono costare alcune decine di migliaia di Euro.

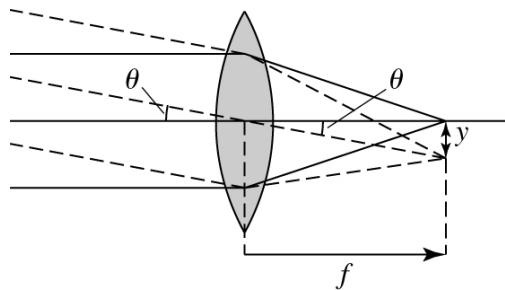
Nella tabella che segue il confronto tra i parametri caratteristici di alcuni CCD Kodak

Model	Research STL-4020M/CM	Research STL-1301E	Research STL-1001E	Research STL-11000M/CM	Research STL-6303E	Internal Guiding CCD	Optional Remote Head
CCD	KAI-4021M/CM	KAF-1301E/LE	KAF-1001E	KAI-11000M/CM	KAF-6303E/LE	TC-237H	TC-237H
Total Pixels	4 million	1.3 million	1 million	11 million	6.3 million	325,000	325,000
Array	2048 x 2048	1280 x 1024	1024 x 1024	4008 x 2672	3072 x 2048	657 x 495	657 x 495
CCD Dimensions	15 x 15 mm	20.5 x 16.4 mm	24.5 x 24.5 mm	36 x 24.7 mm	27.7 x 18.5 mm	4.9 x 3.7 mm	4.9 x 3.7 mm
Pixel Size	7.4 x 7.4 μ	16 x 16 μ	24 x 24 μ	9 x 9 μ	9 x 9 μ	7.4 x 7.4 μ	7.4 x 7.4 μ
CCD Type	Interline	Full Frame	Full Frame	Interline	Full Frame	Frame Transfer	Frame Transfer
CCD Class Available	Single class with no column defects	Single class with no column defects	Class 1, 2	Mono Class 1 only Color Class 1, 2	Class 1, 2	Single class with no column defects	Single class with no column defects
ABG/NABG	ABG only	NABG standard ABG on request	NABG only	ABG only	NABG standard ABG on request	ABG only	ABG only
Full Well Capacity	40,000 e-	120,000 e-	200,000 e-	50,000 e-	100,000 e-	20,000 e-	20,000 e-
Dark Current e-/p/s @ 0C	0.07 e-	3 e-	9 e-	0.5 e-	0.3	25 e-	25 e-
Read Noise rms	7.9 e-	17 e-	14.8 e-	13 e-	13.5 e-	14 e-	14 e-
Gain e-/ADU	0.6	1.6	2	0.8 unbinned 1.6 binned	1.4 unbinned 2.3 binned	0.45	0.45
Full Frame Download	~10 seconds	~3 seconds	~2.5 seconds	~26 seconds	~15 seconds	<1 second	<1 second
Price with Class 2 CCD	\$6695 (Mono or Color)	\$7795	\$7,995	\$7995 (Color Only)	New Price \$10,495	Included	\$695
Price with Class 1 CCD	N/A	N/A	\$12,995	\$8995 (Mono or Color)	New Price \$12,995	Included	\$695

7.5 Dimensione del pixel e Scala dell'Immagine

Uno dei parametri più importanti del sistema telescopio/rivelatore è la **Scala dell'Immagine, IS** (Image Scale o Plate Scale).

Come si vede dall'immagine, uno spostamento angolare sulla sfera celeste corrisponde a uno spostamento lineare sul piano focale la cui entità dipende dal fuoco. A parità di intervallo angolare sotteso dalla sorgente, maggiore è il fuoco, maggiore è la dimensione dell'immagine.



$$y = f \cdot \tan \theta \approx f \cdot \theta$$

$$\frac{dy}{d\theta} = f$$

Viceversa, maggiore è il fuoco minore è l'intervallo angolare rappresentato nel singolo elemento Dy dell'immagine,

$$\Delta\theta = \frac{\Delta y}{f}$$

In pratica, quello che ci interessa sapere è quanto campiona il nostro rivelatore, cioè che frazione angolare della sorgente cade nel singolo pixel.

Se S è la dimensione del pixel in mm, si può dimostrare (si lascia come esercizio) che l'IS è data da:

$$\Delta\theta(\text{arc sec/pixel}) = \frac{S(\mu\text{m})}{f(\text{mm})} 206$$

Si potrebbe pensare che aumentando la focale si possa distribuire sullo stesso pixel un intervallo angolare arbitrariamente piccolo, ovvero risolvere oggetti sempre più vicini angolarmente. Ma c'è un limite inferiore imposto dalla diffrazione legato all'apertura dello strumento e alla lunghezza d'onda della radiazione.

A causa della grande distanza le stelle possono essere assunte come sorgenti puntiformi. L'immagine di una sorgente puntiforme, prodotta da qualsiasi dispositivo ottico, è una figura di diffrazione la cui forma è descritta dall'integrale di diffrazione di Fresnel-Kirchhoff. Nel caso di un telescopio possiamo assumere l'approssimazione di Fraunhofer, valida quando la diffrazione può essere descritta in termini di onde piane.

In questo caso, l'ampiezza del campo U nel piano (p,q) dell'immagine è data da:

$$U(p,q) = \iint G(\alpha, \beta) e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(p\alpha+q\beta)} d\alpha d\beta$$

Dove l'integrale è esteso sul piano (a,b) dell'apertura e G(a,b) è la *pupil function*, cioè la funzione che descrive l'apertura, che, nel caso di un'apertura circolare, come avviene nei telescopi, è costante e uguale a 1 all'interno dell'apertura e zero fuori.

La precedente espressione è essenzialmente la trasformata di Fourier dell'apertura.

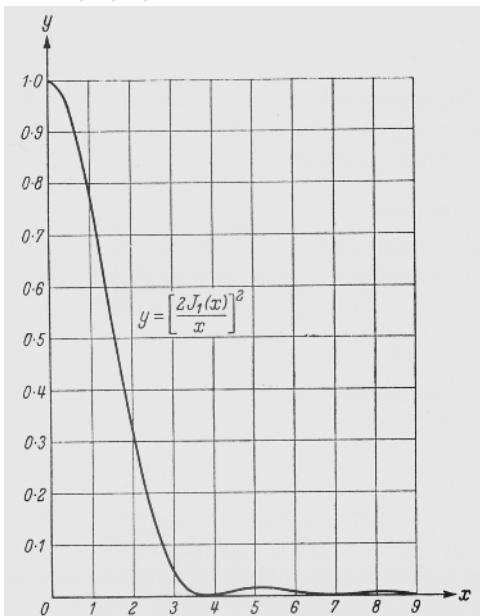
E' ben noto che nel caso monodimensionale il pattern di diffrazione di una apertura (fenditura) nel limite di Fraunhofer ha l'andamento mostrato in figura, con una distribuzione di intensità descritta dalla funzione:

$$I = \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2$$

Abbiamo un massimo principale e dei massimi secondari di intensità decrescente. L'intensità è nulla (interferenza distruttiva) agli angoli forniti dalla relazione:

$$\sin \theta = m \cdot \frac{\lambda}{D}$$

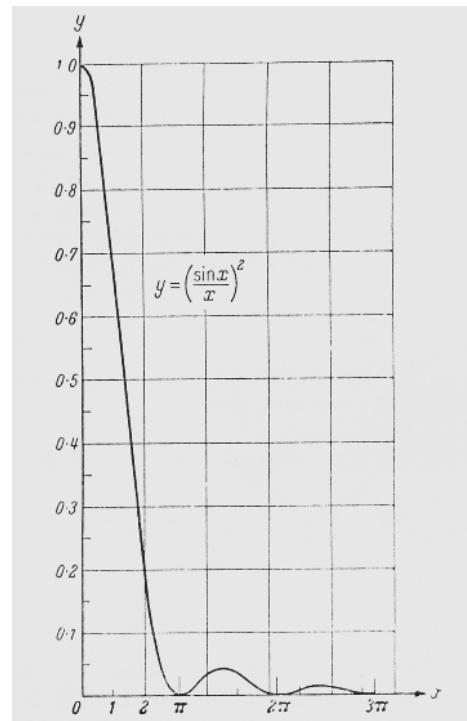
In cui λ è la lunghezza d'onda, D la larghezza dell'apertura e $m = 1, 2, 3, \dots$



circolari di intensità decrescente.

Quasi tutta l'intensità I è concentrata nel massimo centrale. Nel primo anello cade circa l' 1.7% dell'intensità I e nel secondo anello lo 0.4% circa.

La separazione angolare $d\theta$ tra il massimo centrale e il primo minimo (primo anello scuro) è data da:

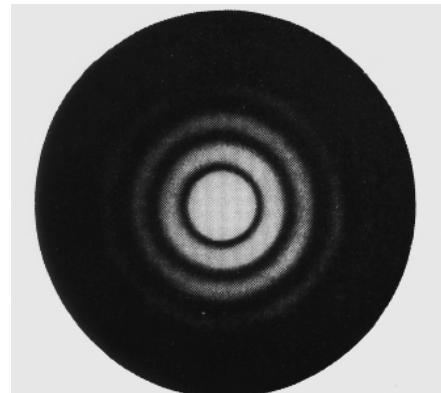


Nel caso bidimensionale di una apertura circolare, la figura di diffrazione è il **pattern di Airy**, la cui distribuzione di intensità è data dall'espressione:

$$I = \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2$$

In cui $J_1(x)$ è una funzione di Bessel del primo tipo di ordine 1 (che passa per lo 0 e ha un andamento oscillante, come una funzione trigonometrica).

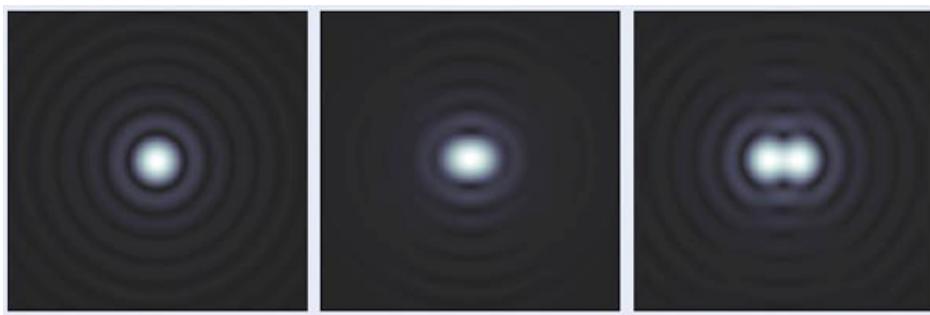
Anche in questo caso abbiamo una distribuzione di minimi e di massimi, in questo caso sotto forma di un disco centrale e di una successione di anelli



$$\delta\theta = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Dove D è il diametro del telescopio.

Questa espressione è assunta, in accordo con il **criterio di Rayleigh** come **Risoluzione** del telescopio. Se abbiamo due sorgenti (due stelle) separate da una distanza angolare pari a $1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$, allora il massimo di una delle due figure di diffrazione cade nel primo minimo dell'altra e in queste condizioni si assume che non sia possibile distinguere le due sorgenti, anche se diminuiamo la scala dell'immagine aumentando la focale.



Da sinistra a destra immagine di due sorgenti puntiformi al diminuire della risoluzione (aumento del potere risolvente). Nell'immagine di destra la separazione angolare soddisfa il criterio di Rayleigh.

In unità pratiche, utilizzando $\lambda = 530$ nm (centro dello spettro visibile), si ottiene:

$$\delta\theta \approx \frac{134}{D(\text{mm})}$$

Con dq in arcsec. Come ordine indicativo di grandezza si può assumere che un telescopio con un obiettivo di 130 mm di diametro ha una risoluzione angolare di circa 1 arcsec.

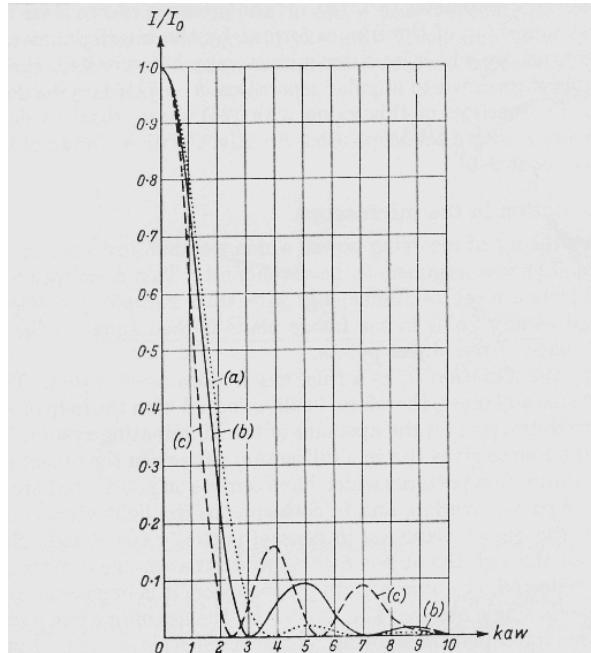
Questo valore per la risoluzione è solo indicativo in quanto le cose possono cambiare in funzione dell'intensità relativa delle due sorgenti (contrasto) e utilizzando un CCD che è più sensibile dell'occhio alle piccole variazioni d'intensità. A volte, al posto di 134, si usa 116 (**limite di Dawes**).

In ogni caso, a causa della larghezza finita del massimo centrale del pattern di Airy – dovuta al fatto che usiamo specchi di dimensione finita - ogni telescopio fornisce una immagine allargata di una sorgente puntiforme e quindi ha una risoluzione finita.

In pratica ogni configurazione ottica “deforma” l'immagine di una sorgente puntiforme in maniera caratteristica, che dipende dalla particolare configurazione e che quasi sempre si discosta dal pattern di Airy ideale. La forma di questa funzione caratteristica si chiama **Point Spread Function** (PSF) e caratterizza otticamente il sistema (telescopio-ottiche-rivelatore) utilizzato.

Il limite di risoluzione ottenuto è valido per un sistema ottico non ostruito come il telescopio a rifrazione e in assenza di turbolenza atmosferica.

Nel caso di ostruzione (come per tutti i telescopi a riflessione) la pupil function nell'integrale di diffrazione di Fraunhofer deve essere opportunamente modificata. Nel caso dell'ostruzione tipica dei Cassegrain (o dei Newtoniani), la pupil function è una corona circolare in cui il raggio esterno è quello dell'apertura del telescopio e quello interno è quello dell'ostruzione. Nella figura che segue si vede come viene modificato il pattern di Airy in funzione dell'apertura relativa dell'ostruzione.



Effetto dell'ostruzione sul pattern di Airy: (a) pattern di Airy senza ostruzione, (b) ostruzione con raggio pari a metà del raggio dell'apertura, (c) raggio dell'ostruzione tendente al raggio dell'apertura.

Come si vede, all'aumentare dell'ostruzione, diminuisce il raggio del primo anello scuro (primo minimo), pertanto la risoluzione aumenta. Ma questo al prezzo di una diminuita intensità nel massimo principale e di un aumento dell'intensità nei massimi secondari che comporta un segnale più debole e una diminuzione del contrasto.

Pertanto la risoluzione dei telescopi a riflessione (in cui l'ostruzione è tipicamente del 30-40%) è leggermente migliore di quella dettata dal criterio di Rayleigh, rispetto ai telescopi a rifrazione di pari apertura. Ma questo al prezzo di un peggior contrasto (vedi figura sotto).



Pattern di Airy di alcune configurazioni ottiche. In uno Schmidt-Cassegrain, a causa dell'ostruzione, parte dell'intensità del massimo centrale viene distribuita negli anelli del pattern di diffrazione, riducendo il contrasto.

Nelle osservazioni effettuate al di sotto dell'atmosfera il limite alla risoluzione è in genere dettato dal seeing che misura il contributo all'allargamento angolare della PSF dovuto alla turbolenza atmosferica.

Pertanto, in genere, il dq sperimentale è maggiore (in alcuni casi molto maggiore) del limite imposto dal criterio di Rayleigh (o di Dawes). Solo in alcuni siti sulla Terra il seeing scende sotto 0.5'', una risoluzione ottenibile con un telescopio di meno di 30 cm di apertura. Tipicamente a Roma, il seeing è dell'ordine di 3-4 '' (meno di 2'' in qualche rara nottata).¹

7.6 Campionamento (scala dell'immagine ottimale)

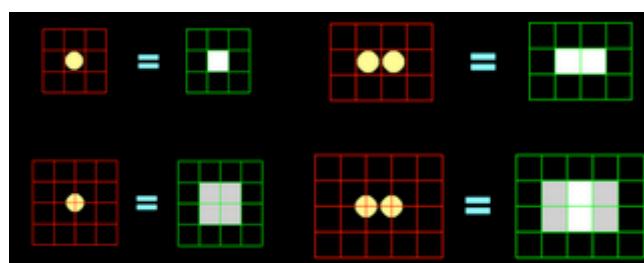
Supponendo di avere un certo dq sperimentale (che dipende anche dalle particolari condizioni di osservazione e che può quindi variare da notte a notte) in quanti pixel del nostro rivelatore è opportuno distribuire questa "quantità massima" di informazione angolare ?

Per rispondere a questa domanda si utilizza il Criterio del Campionamento di Nyquist il quale stabilisce che, dato un segnale, con larghezza di banda finita, la frequenza minima di campionamento di tale segnale deve essere almeno il doppio della sua massima frequenza.

Una applicazione di questo criterio è ad esempio la musica digitale con i suoi formati tra i quali il diffusissimo [mp3](#). Non a caso la frequenza media di campionamento di un file mp3 è di 44.1 kHz praticamente il doppio delle massime frequenze udibili dall'orecchio umano (20 kHz) che è il nostro sensore (analogico) per la percezione dei suoni.

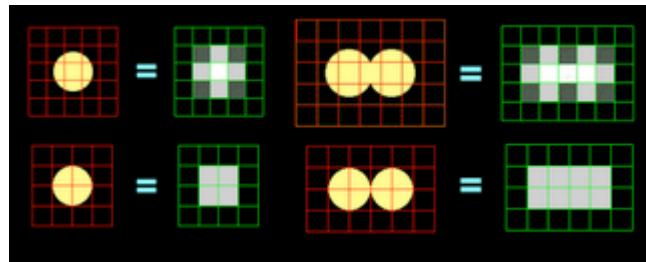
Nel caso di una immagine astronomica, la frequenza spaziale (angolare) massima corrisponde a un periodo minimo dq, dobbiamo quindi campionare dq/2.

Se *sottocampioniamo* (figura sotto) il disco stellare, in giallo, può essere esattamente inscritto nel perimetro del pixel (sopra) oppure cadere esattamente al centro dell'intersezione di 4 pixel (in basso). Come è possibile vedere a destra del segno uguale, nella rappresentazione dei pixel che compongono la relativa immagine digitale, la forma del disco stellare è indistinguibile in entrambi i casi e a maggior ragione è impossibile avere una separazione ottica di due oggetti.



Sottocampionamento: se il campionamento è uguale al potere risolutivo dell'ottica il CCD non risolve due sorgenti separate

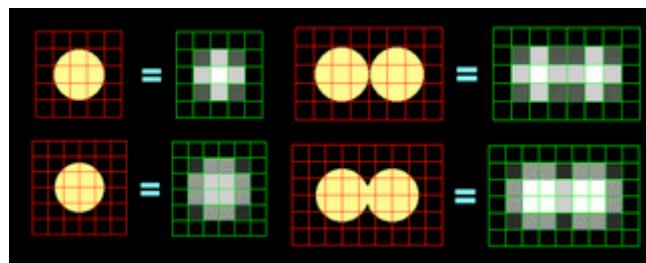
¹ E' possibile ottenere risoluzioni che si avvicinano alla risoluzione teorica "congelando" il seeing (che si compone di molte frequenze) o comunque moderando i suoi effetti con opportune ottiche adattive e su campi angolari molto ristretti. Anche alcune tecniche di deconvoluzione (che partono da una buona conoscenza della PSF del nostro sistema e da un ottimo segnale) consentono a volte di migliorare notevolmente la risoluzione del dato finale.



Campionamento pari alla metà del potere risolutivo dell'ottica ovvero soddisfa il criterio di Nyquist (il CCD risolve le due sorgenti, con qualche limitazione).

Nel caso del campionamento corretto, disco stellare può cadere esattamente al centro di un pixel coprendo in parte i 6 pixel adiacenti oppure cadere esattamente sull'intersezione di quattro pixel. Per quest'ultimo caso, come è possibile vedere nella rappresentazione dell'immagine digitale, il disco stellare può non apparire ancora ben distinguibile come non appaiono separabili i due oggetti posti al limite della risoluzione visuale.

Per questo talvolta si usa *sovracampionare* usando una IS (arcsec/pixel) compresa tra circa 1/3 e 1/4 del limite di risoluzione (imposto dal seeing).



Sovracampionamento

In questo caso le sorgenti appaiono ben risolte, inoltre, sovracampionando lavorano meglio tutti i software di deconvoluzione.

Tuttavia è opportuno non eccedere nel campionamento in quanto un eccessivo sovracampionamento, distribuendo l'immagine su molti pixel, tende a peggiorare il rapporto S/N nel singolo pixel e quindi quello complessivo.

In linea di principio, come regola “del pollice”, si può comunque utilizzare il criterio di base del campionamento.

Dalla locazione di Roma un campionamento di 2 arcsec/pixel va in genere bene. E può essere spinto fino a 1 arcsec/pixel con ottimo seeing e/o applicazioni particolari.

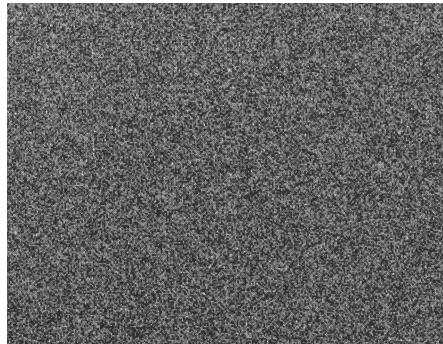
7.7 Correzioni tipiche da apportare all'immagine ottenuta con un CCD (cenni)

L'immagine ottenuta con un CCD, **raw frame**, necessita una serie di correzioni per giungere al **light frame**, l'immagine "pulita" finale. Queste correzioni sono attuabili abbastanza facilmente grazie alla possibilità di manipolare digitalmente l'immagine, cosa impossibile, a esempio, con una pellicola.

Possiamo pensare l'immagine come la sovrapposizione di più frames.

Il **bias frame** è quello dovuto alle correnti di polarizzazione inversa, presente semplicemente in quanto il dispositivo è acceso. Si ottiene acquisendo un "immagine" a tempo di esposizione = 0. In ogni caso al bias frame risulta sempre sovrapposto il readout noise.

Il **dark frame** è quello dovuto alla dark current. Si ottiene esponendo il CCD per un certo tempo a otturatore chiuso (senza sorgenti di segnale) e sottraendo il bias frame. Sotto è mostrato un esempio di thermal frame: a causa della generazione termica di elettroni il frame non è completamente nero.



Il dark frame va sottratto al raw frame per ottenere il light frame, ovvero l'immagine dovuta solo alla sorgente esterna.

Il bias frame e il dark frame devono essere misurati per ogni CCD e per ogni condizione di lavoro e sottratti al raw frame acquisito nelle stesse condizioni.

Infine è necessario effettuare la correzione del **flat field**. A causa delle piccole differenze di comportamento tra i pixel e di altre cause, come pixel difettosi, sporcizia o altro, non tutta la superficie del CCD risponde nello stesso modo, in maniera "piatta" al segnale. E' come far passare la luce attraverso una lastra di vetro non esattamente omogenea. Inoltre, a causa delle caratteristiche del sistema ottico, la superficie del CCD non è illuminata sempre in maniera omogenea (vignettatura).

Il flat field si ottiene esponendo il CCD a una sorgente di illuminazione uniforme.

In definitiva le operazioni da effettuare sul segnale del pixel raw, P_{raw} , per ottenere il pixel del frame ridotto P_L sono sintetizzate nell'espressione seguente, in cui $\langle F \rangle$ è il valore medio del Flat Field:

$$P_L = \frac{P_{raw} - D}{F} \langle F \rangle$$

Spesso si acquisiscono più file che, una volta ridotti e messi a registro in maniera che ci sia una corretta corrispondenza pixel per pixel, vengono opportunamente sommati tra loro (media, mediana o altro). Dal punto di vista del rapporto S/N si ottiene una immagine quasi equivalente a una immagine ottenuta con un tempo di esposizione pari alla somma dei tempi delle singole sot toesposizioni..